

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-076522
(43)Date of publication of application : 15.03.2002

(51)Int.Cl. H01S 5/343
H01S 5/028

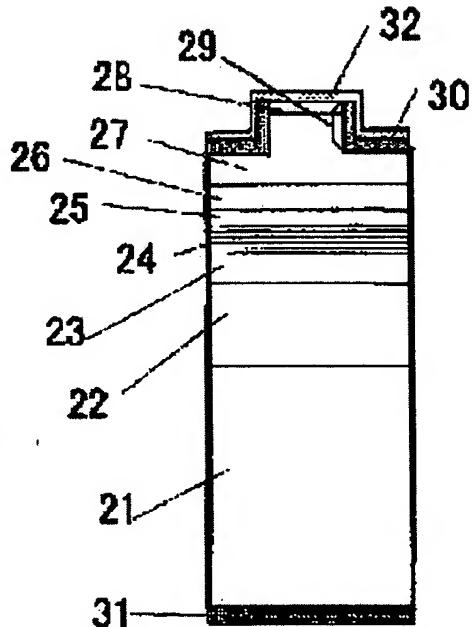
(21)Application number : 2000-265787 (71)Applicant : NEC CORP
(22)Date of filing : 01.09.2000 (72)Inventor : YAMAGUCHI ATSUSHI
KURAMOTO MASARU
NIDOU MASAAKI

(54) NITRIDE SEMICONDUCTOR LASER

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To reduce the threshold current density of a semiconductor-laser using a gallium nitride-based semiconductor material.

SOLUTION: The semiconductor laser has a structure in which a gallium nitride-based semiconductor layer containing an n-type clad layer 22 and a multiple quantum well layer 24 containing an $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$, $0 \leq y \leq 0.2$) light emitting layer is laminated upon a low-dislocation n-type GaN substrate 21. The threshold mode gain per one quantum well of the quantum well layer 24 is adjusted to $\leq 12 \text{ cm}^{-1}$ and the standard deviation of the microscopic fluctuation of the band gap energy of the light emitting layer is controlled to 75–200 meV.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 26.04.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 02.03.2005

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-76522

(P2002-76522A)

(43)公開日 平成14年3月15日 (2002.3.15)

(51)Int.Cl.⁷

H 01 S 5/343
5/028

識別記号

F I

H 01 S 5/343
5/028

テーマト^{*}(参考)

5 F 0 7 3

審査請求 有 請求項の数24 O L (全 24 頁)

(21)出願番号

特願2000-265787(P2000-265787)

(22)出願日

平成12年9月1日 (2000.9.1)

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72)発明者 山口 敦史

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株
式会社内

(72)発明者 倉本 大

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株
式会社内

(74)代理人 100088328

弁理士 金田 誠之 (外2名)

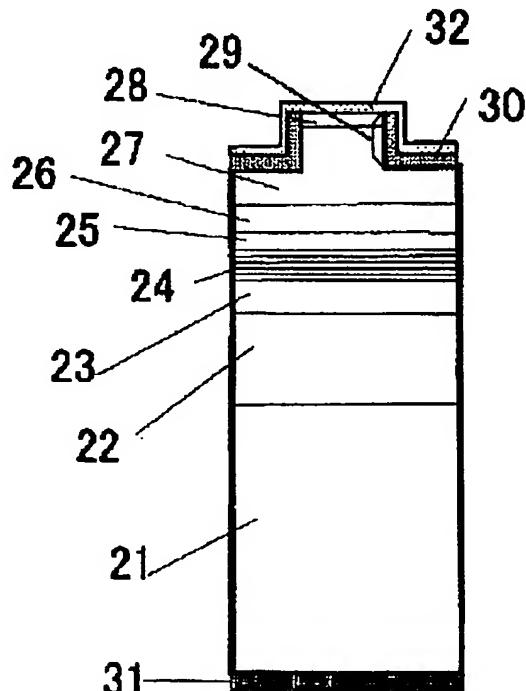
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 窒化物半導体レーザ

(57)【要約】

【課題】 窒化ガリウム系半導体材料を用いた半導体レー
ザのしきい値電流密度を低減すること。

【解決手段】 低転位n-GaN基板21上に、n型クラ
ッド層22と、In_xAl_yGa_{1-x-y}N ($0 < x < 1$,
 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む多重量子井戸層24と、
を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、
量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12 cm^{-1}
以下であり、発光層のバンドギャップエネルギーの微視
的揺らぎの標準偏差が $75 \sim 200 \text{ meV}$ であることを
特徴とする窒化物半導体レーザ。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 1.2 cm^{-1} 以下であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が $7.5 \sim 200\text{ meV}$ であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項2】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 1.2 cm^{-1} 以下であり、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、 $0.5 \times 10^{-20}\text{ (m}^2\text{)} \leq d g / d n \leq 0.7 \times 10^{-20}\text{ (m}^2\text{)}$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項3】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含むn個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、内部損失 α

$$S \geq 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

R_1 ：レーザ出射方向側の共振器端面の反射率

R_2 ：レーザ出射方向と逆側の共振器端面の反射率

α_m ：ミラー損失

を満たし、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が $7.5 \sim 200\text{ meV}$ であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項6】 窒化ガリウム系材料またはサファイアか

$$S \geq 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

R_1 ：レーザ出射方向側の共振器端面の反射率

R_2 ：レーザ出射方向と逆側の共振器端面の反射率

α_m ：ミラー損失

を満たし、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、 $0.5 \times 10^{-20}\text{ (m}^2\text{)} \leq d g / d n \leq 0.7 \times 10^{-20}\text{ (m}^2\text{)}$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項7】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含むn個の

$i[\text{cm}^{-1}]$ が、

$\alpha_i \leq 1.2 \times n - \alpha_m$

(共振器端面のミラー損失を $\alpha_m[\text{cm}^{-1}]$ とする。) であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が $7.5 \sim 200\text{ meV}$ であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項4】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含むn個の

量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、内部損失 $\alpha_i[\text{cm}^{-1}]$ が、

$\alpha_i \leq 1.2 \times n - \alpha_m$

(共振器端面のミラー損失を $\alpha_m[\text{cm}^{-1}]$ とする。) であり、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、 $0.5 \times 10^{-20}\text{ (m}^2\text{)} \leq d g / d n \leq 0.7 \times 10^{-20}\text{ (m}^2\text{)}$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項5】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含むn個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、スロープ効率 $S[\text{W/A}]$ が、下記式

【数1】

$$(1 - R_1)\sqrt{R_2} \\ (1 - \sqrt{R_1R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})$$

らなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含むn個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、スロープ効率 $S[\text{W/A}]$ が、下記式

【数2】

$$(1 - R_1)\sqrt{R_2} \\ (1 - \sqrt{R_1R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})$$

40

量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、共振器長が $200\mu\text{m}$ 以上であり、共振器端面の両面に反射率80%以上100%未満の高反射コーティング膜を備えた窒化物半導体レーザであって、スロープ効率が $1.4/n[\text{W/A}]$ 以上であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が $7.5 \sim 200\text{ meV}$ であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項8】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含むn個の

3

N ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、共振器長が $200 \mu m$ 以上であり、共振器端面の両面に反射率 80 % 以上 100 % 未満の高反射コーティング膜を備えた窒化物半導体レーザであって、スロープ効率が $1.4/n$ [W/A] 以上であり、前記活性層の微分利得 $d g/dn$ が、

$$0.5 \times 10^{-20} (m^2) \leq d g/dn \leq 0.7 \times 10^{-20} (m^2)$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 9】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、フォトルミネッセンスピーク波長分布が $40 meV$ 以下であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が $7.5 \sim 200 meV$ であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 10】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、フォトルミネッセンスピーク波長分布が $40 meV$ 以下であり、前記活性層の微分利得 $d g/dn$ が、

$$0.5 \times 10^{-20} (m^2) \leq d g/dn \leq 0.7 \times 10^{-20} (m^2)$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 11】 請求項 9 または 10 に記載の窒化物半導体レーザであって、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が $12 cm^{-1}$ 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 12】 請求項 1 乃至 11 いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が $8 cm^{-1}$ 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 13】 請求項 1 乃至 12 いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、量子井戸の井戸数が 3 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 14】 請求項 1 乃至 13 いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、前記基板は、表面転位密度が 10^8 個/ cm^2 未満の窒化ガリウム系半導体基板であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 15】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、共振器長が $200 \mu m$ 以上であり、共振器端面の両面に反射率 80 % 以上 100 % 未満の高反射コーティング膜を備えた窒化物半導体レーザであって、スロープ効率が $1.4/n$ [W/A] 以上であり、前記活性層の微分利得 $d g/dn$ が、

$1-x-yN$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が $12 cm^{-1}$ より大きく、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が $40 meV$ 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 16】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が $12 cm^{-1}$ より大きく、前記活性層の微分利得 $d g/dn$ が、

$$d g/dn \geq 1.0 \times 10^{-20} (m^2)$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 17】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、内部損失 $\alpha_i [cm^{-1}]$ が、

$$\alpha_i > 1.2 \times n - \alpha_m$$

(共振器端面のミラー損失を $\alpha_m [cm^{-1}]$ とする。) であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が $40 meV$ 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 18】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、内部損失 $\alpha_i [cm^{-1}]$ が、

$$\alpha_i > 1.2 \times n - \alpha_m$$

(共振器端面のミラー損失を $\alpha_m [cm^{-1}]$ とする。) であり、前記活性層の微分利得 $d g/dn$ が、

$$d g/dn \geq 1.0 \times 10^{-20} (m^2)$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項 19】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、スロープ効率 S [W/A] が、下記式

【数 3】

$$S < 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

R₁ : レーザ出射方向側の共振器端面の反射率

R₂ : レーザ出射方向と逆側の共振器端面の反射率

α_m : ミラー損失

を満たし、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が4.0 m e V以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項20】 窒化ガリウム系材料またはサファイア

$$S < 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

R₁ : レーザ出射方向側の共振器端面の反射率

R₂ : レーザ出射方向と逆側の共振器端面の反射率

α_m : ミラー損失

を満たし、前記活性層の微分利得 d g / d n が、
d g / d n ≥ 1. 0 × 10⁻²⁰ (m²)

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項21】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、In_xAl_yGa_{1-x-y}N (0 < x < 1, 0 ≤ y ≤ 0.2) 発光層を含むn個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、共振器長が1mm以下であり、共振器端面のうち、レーザ出射方向側の共振器端面は、コーティング膜を備えずに前記活性層が露出しているか、または、反射率20%以下のコーティング膜を備えており、レーザ出射方向と逆側の共振器端面に、反射率80%以上100%未満の高反射コーティング膜を備えた窒化物半導体レーザであつて、スロープ効率が2.1/n [W/A]未満であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が4.0 m e V以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項22】 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、In_xAl_yGa_{1-x-y}N (0 < x < 1, 0 ≤ y ≤ 0.2) 発光層を含むn個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、共振器長が1mm以下であり、共振器端面のうち、レーザ出射方向側の共振器端面は、コーティング膜を備えずに前記活性層が露出しているか、または、反射率20%以下のコーティング膜を備えており、レーザ出射方向と逆側の共振器端面に、反射率80%以上100%未満の高反射コーティング膜を備えた窒化物半導体レーザであつて、スロープ効率が2.1/n [W/A]未満であり、前記

からなる基板上に、クラッド層と、In_xAl_yGa_{1-x-y}N (0 < x < 1, 0 ≤ y ≤ 0.2) 発光層を含むn個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、スロープ効率S [W/A]が、下記式

【数4】

活性層の微分利得 d g / d n が、
d g / d n ≥ 1. 0 × 10⁻²⁰ (m²)

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項23】 請求項15乃至22いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、フォトルミネッセンスピーカー波長分布が4.0 m e V以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【請求項24】 請求項15乃至23いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、前記基板は、表面転位密度が10⁸個/cm²未満の窒化ガリウム系半導体基板であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板を用いた窒化物半導体レーザに関する。

【0002】

【従来の技術】 窒化物半導体は青紫色レーザ素子の材料としてたいへん有望であり、中村他がJpn. J. Appl. Phys. vol. 36(1997), pp. L1568-1571で報告しているように、既に室温において2mW出力で1万時間以上の連続発振寿命が報告されている。図10にそのレーザの断面構造図を示す。図10のレーザ素子においては、サファイア基板101上のGaN膜102上に、ストライブ状のSiO₂膜(マスク)103を形成し、その上にGaNを成長することによって選択成長させ、マスク上に横方向成長した低転位密度のGaNを形成し、その低転位密度領域104の上にp電極105が形成されるようにレーザ素子を作製している。中村他による上記の方法によって作製されたGaN基板はELOG(Epitaxial Lateral Overgrowth GaN)基板と呼ばれており、SiO₂マスクの無い部分(窓領域)の上部では、サファイア基板上GaN膜の高密度の貫通転位がそのまま引き継がれて膜が成長するために、高い(10

12m^{-2} 以上) 転位密度となっているが、 SiO_2 マスクの上部ではマスクによって転位の伝播がさえぎられるために、低い(10^{11}m^{-2} 未満)転位密度が実現している。ただし、 SiO_2 マスクの中心付近では両側の窓領域から横向成長してきたGaNがぶつかるため、転位が新たに発生し高い転位密度となっている。そして、低転位領域(SiO_2 マスク上で中心から離れた部分:図でハッチングしていない領域)104の上部にp電極105が形成されるようにレーザ素子を作製すると、活性層内の低転位密度領域に電流が注入されるため、転位に起因した素子の劣化が起こりにくくなり、素子の寿命が長くなると考えられる。図10のレーザ素子は、Siドープn型GaN-ELOG基板106上にSiドープn型 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層107、120周期のSiドープn型GaN層(厚さ2.5nm)とアンドープ $\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}$ 層(厚さ2.5nm)からなるn型クラッド層108、Siドープn型GaN(厚さ0.1mm)からなるn型光閉じ込め層109、Siドープn型 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 量子井戸層(厚さ3.5nm)とSiドープn型 $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 障壁層(厚さ10.5nm)からなる多重量子井戸活性層110、Mgドープp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ キャップ層(厚さ20nm)111、Mgドープp型GaN(厚さ0.1mm)からなるp型光閉じ込め層112、120周期のMgドープp型GaN層(厚さ2.5nm)とアンドープ $\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}$ 層(厚さ2.5nm)からなるp型クラッド層113、Mgドープp型GaN(厚さ0.05mm)からなるp型コンタクト層114を順に成長した後に、ドライエッチングなどにより図に示すようなリッジ構造を形成し、最後にNiとAuからなるp電極105とTiとAlからなるn電極115を蒸着して作製されている。

【0003】一方、発明者らはJpn. J. Appl. Phys. vol. 36(1997), pp. L899-902あるいはNEC Research and Development vol. 41(2000)No. 1pp. 74-85述べているように、FIELD0(Facet-Initiated Epitaxial Lateral Overgrowth)と呼ばれる方法によって基板あるいは活性層全面にわたって転位密度を低くすることに成功している。FIELD0においては、ELOGと同様にサファイア基板上のGaN膜上に、ストライプ状の SiO_2 膜(マスク)を形成するが、ハイドライド気相成長によって選択成長させることによって貫通転位を曲げることができ、ELOGのように転位密度の高い領域は生じず、基板全面にわたって転位密度を低くできる。このようにして得た低転位密度のn-GaN基板を用いて、窒化物半導体レーザを作製した例を図9に示す。図に示すように、低転位密度のn-GaN基板21上にSiドープn型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ (シリコン濃度 $4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、厚さ1.2μm)からなるn型クラッド層22、Siドープn型GaN(シリコン濃度 $4 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、厚さ0.1μm)からなるn型光閉じ込め層23、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (厚さ3nm)井戸層とSiドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ (シリコン濃度 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 厚さ5nm)バリア層からなる多重量子井戸層24(井戸数3個)、Mgドープp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ から

なるキャップ層25、Mgドープp型GaN(Mg濃度 $2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、厚さ0.1μm)からなるp型光閉じ込め層26、Mgドープp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ (Mg濃度 $2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、厚さ0.5μm)からなるp型クラッド層27、Mgドープp型GaN(Mg濃度 $2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、厚さ0.1μm)からなるp型コンタクト層28を順次成長させて、LD構造を形成した。レーザ構造の形成は、200hPaの減圧MOVPE(有機金属気相エピタキシ)装置を用いて行われた。窒素原料10に用いたアンモニアの分圧は147hPaであり、Ga、Al、In材料はTMG、TMA、TMiを用いた。成長温度は、InGaNからなる多重量子井戸活性層24では780°Cであり、その他の層においてはすべて1050°Cを行った。ドライエッチングによりp型クラッド層27そしてp型コンタクト層28を含んだメサ型29を部分的に残した後、 SiO_2 絶縁膜30を形成した。また、メサ部分の頭出しを露光技術によりを行い、リッジ構造を形成した。n型基板裏にはTi/Aiからなるn電極31を形成し、pコンタクト上には、Ni/Auからなるp電極32を形成した。へき開によりレーザ共振器端面を形成し、片面のみを $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ で高反射コーティング(反射率95%)したものと両面を $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ で高反射コーティング(反射率95%)したもの2つの素子を行った。得られた半導体レーザのしきい値電流密度は片面コートのものが 3.0kA/cm^2 、両面コートのものが 1.5kA/cm^2 であった。

【0004】上記の従来例にも示されているように、窒化物半導体青色レーザ素子では、通常InGaN量子井戸が活性層に用いられている。しかし、結晶成長において均質なInGaN混晶膜を作製することは容易ではなく、InGaN量子井戸活性層においては、混晶組成揺らぎが生じていると考えられている。従来の半導体デバイスの常識から言えば、このような組成揺らぎはデバイス特性を悪化させる要因となり、根絶すべきものである。しかしながら、窒化物半導体レーザにおいては、逆に組成揺らぎのおかげで特性の良い素子が実現しているという指摘がある。例えば、秩父他はAppl. Phys. Lett., vol. 71p. 2346(1997)の中で、InGaN量子井戸のカソードルミネッセンス(CL)像の観察結果からIn組成揺らぎやキャリアの拡散長30について考察を行い、従来の半導体材料に比べて桁違いに欠陥密度の高い窒化物において高い発光効率が実現しているのは、In組成揺らぎのつくる電子(あるいは正孔)のポテンシャル揺らぎがキャリアを局在化し、非輻射中心へのキャリア捕獲を抑制しているためであると推察している。この議論が正しければ、欠陥密度を低減しなくとも組成揺らぎを大きくすることで発光効率が向上し、デバイス特性が向上することが期待される。しかしながら、レーザ素子では光学利得がデバイス特性に関わるため、In組成揺らぎによって引き起こされる状態密度40の変化が利得特性を大きく変え、事情は複雑である。例

えば、Chow他はAppl. Phys. Lett., vol. 71p. 2608(1997)の中で組成揺らぎは利得スペクトルの幅を広げるため、揺らぎにより利得ピーク値が下がり、しきい値電流密度が上がると理論予測している。

【0005】一方、活性層のIn組成揺らぎを制御する技術として、特開平11-340580号公報では、フォトルミネッセンス（以下、「PL」と略記する）ピーク波長分布から測定される活性層内の組成均一性向上させることにより、多波長発振を防止できるとされている。同公報には、従来の半導体レーザの技術水準に関し、「InGaN混晶は非常に混ざりにくいことが知られており、非混晶領域が大きく、且つ、In組成比が0.2以下と小さい領域においても、In組成比の増加に伴い組成分離している割合が大きくなるという問題がある。この結果、In組成比が0.15程度のInGaN層において、200μm程度のマクロな領域で見たフォトルミネッセンス（PL）スペクトルの半値幅は、組成分離による結晶内不均一を反映して非常に大きく、良い結晶でも150meVである。」ことを示している。これに対して同公報記載の半導体レーザは、品質の良好なSiC基板を用い、結晶成長速度を調整することにより、PLピーク波長分布を約90meVに低減でき、多波長発振を防止できることが示されている。

【0006】しかしながら同公報記載の技術では、PLピーク波長分布を低減した半導体レーザの開示は、PLピーク波長分布約90meVのものにとどまり、これ以下の揺らぎの半導体レーザについての具体的開示はない。すなわち、PLピーク波長分布をさらに低減した場合、レーザ特性にどのような影響を与えるか、ということについては明らかにされていない。

【0007】このように、In組成揺らぎがレーザ特性に及ぼす効果はまだ総合的に理解されたという状況に至っておらず、レーザの活性層InGaN量子井戸において組成揺らぎがどうあるべきかという基本的な疑問が解決されないままとなっている。

【0008】ところで、青色レーザの用途として最も注目されているのは、DVDなどの光ディスクに対する書き込みや読み込みの光源としての用途である。青色レーザの光出力としては、読み込み時には3mW程度の出力が、書き込み時には30mW程度の出力が必要になると言われている。そして、書き込みを伴うDVD-RAMなどに搭載するレーザ（以下高出力仕様レーザと呼ぶ）においては、30mWという高い光出力を得るために共振器ミラー面の片面（光出射側と逆側の面）だけを高反射コーティングするのが望ましいと考えられている。また、読み込みしか行わないDVD-ROMやポータブルDVDプレーヤーなどに搭載するレーザ（以下低出力仕様レーザと呼ぶ）においては、低出力動作でのしきい値電流密度を下げるために2つの共振器ミラーをともに高反射コーティング（以下、HRコーティングと称する）するのが望ましいと考えられてい

る。

【0009】高出力仕様レーザでは70°Cにおいて、30mW出力で5000時間以上の素子寿命が必要と考えられている。それにもかかわらず、中村他がJSAP International No.1pp.5-17(2000)に述べているように、これまでのところ、60°Cにおいても、30mW出力で500時間程度の素子寿命しか実現していない。30mWでの動作電流を低減することができれば、この寿命は長くなると考えられ、今後より低しきい値の高出力レーザが必要となる。

10 【0010】また、低出力仕様レーザでは、電池を電源に用いたポータブルDVDプレーヤーの用途を考えると低消費電力が要求される。そのために、まず第一に、レーザの基本的な特性であるしきい値電流密度を低減することが必要となる。しかしながら、窒化物半導体レーザにおいては、従来の他の半導体レーザのように、1kA/cm²未満のしきい値電流密度は報告されておらず、著しくしきい値電流密度が高いという状況にある。

【0011】以上のように、青色レーザは、用途に応じて異なる仕様、構成が採用される。

20 【0012】

【発明が解決しようとする課題】本発明はこうした背景を鑑みてなされたものであり、本発明の目的とするところは、高出力仕様、低出力仕様などの半導体レーザの、それぞれの仕様に応じて、活性層のIn組成揺らぎやバンドギャップエネルギーの揺らぎを高度に制御し、これにより、しきい値電流密度を飛躍的に低減する手法を提供するものである。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明に係る半導体レーザは、以下の事項により特定される。

[1] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、In_xAl_yGa_{1-x-y}N（0 < x < 1、0 ≤ y ≤ 0.2）発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が12cm⁻¹以下であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が75～200meVであることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[2] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、In_xAl_yGa_{1-x-y}N（0 < x < 1、0 ≤ y ≤ 0.2）発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が12cm⁻¹以下であり、前記活性層の微分利得d_g/d_nが、

$$0.5 \times 10^{-20} \text{ (m}^2\text{)} \leq d_g/d_n \leq 0.7 \times 10^{-20} \text{ (m}^2\text{)}$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[3] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、In_xAl_yGa_{1-x-y}N（0 <

基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、フォトルミネッセンスピーク波長分布が40 meV以下であり、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、

$$0.5 \times 10^{-20} \text{ (m}^2\text{)} \leq d g / d n \leq 0.7 \times 10^{-20} \text{ (m}^2\text{)}$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[11] [9] または [10] に記載の窒化物半導体レーザであって、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12 cm^{-1} 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[12] [1] 乃至 [11] いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 8 cm^{-1} 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[13] [1] 乃至 [12] いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、量子井戸の井戸数が 3 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[14] [1] 乃至 [13] いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、前記基板は、表面転位密度が $10^8 \text{ 個}/\text{cm}^2$ 未満の窒化ガリウム系半導体基板であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[15] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12 cm^{-1} より大きく、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が 40 meV 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[16] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した

$$S < 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

[0019] R_1 : レーザ出射方向側の共振器端面の反射率

R_2 : レーザ出射方向と逆側の共振器端面の反射率

α_m : ミラー損失

を満たし、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が 40 meV 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[20] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる

構造を有し、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12 cm^{-1} より大きく、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、

$$d g / d n \geq 1.0 \times 10^{-20} \text{ (m}^2\text{)}$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[17] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、内部損失 α_i [cm^{-1}] が、

$$\alpha_i > 12 \times n - \alpha_m$$

(共振器端面のミラー損失を α_m [cm^{-1}] とする。) であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が 40 meV 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[18] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、内部損失 α_i [cm^{-1}] が、

$$\alpha_i > 12 \times n - \alpha_m$$

(共振器端面のミラー損失を α_m [cm^{-1}] とする。) であり、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、

$$d g / d n \geq 1.0 \times 10^{-20} \text{ (m}^2\text{)}$$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

[19] 窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、スロープ効率 S [W/A] が、下記式

【0018】

【数7】

基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、スロープ効率 S [W/A] が、下記式

【0020】

【数8】

$$S < 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

【0021】 R_1 ：レーザ出射方向側の共振器端面の反射率

R_2 ：レーザ出射方向と逆側の共振器端面の反射率

α_m ：ミラー損失

を満たし、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、
 $d g / d n \geq 1.0 \times 10^{-20} (\text{m}^2)$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【21】窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、共振器長が 1 mm 以下であり、共振器端面のうち、レーザ出射方向側の共振器端面は、コーティング膜を備えずに前記活性層が露出しているか、または、反射率 20% 以下のコーティング膜を備えており、レーザ出射方向と逆側の共振器端面に、反射率 80% 以上 100% 未満の高反射コーティング膜を備えた窒化物半導体レーザであって、スロープ効率が $2.1 / n [\text{W}/\text{A}]$ 未満であり、前記発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差が 4.0 meV 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【22】窒化ガリウム系材料またはサファイアからなる基板上に、クラッド層と、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を含む n 個の量子井戸からなる量子井戸構造の活性層と、を含む窒化ガリウム系半導体層が積層した構造を有し、共振器長が 1 mm 以下であり、共振器端面のうち、レーザ出射方向側の共振器端面は、コーティング膜を備えずに前記活性層が露出しているか、または、反射率 20% 以下のコーティング膜を備えており、レーザ出射方向と逆側の共振器端面に、反射率 80% 以上 100% 未満の高反射コーティング膜を備えた窒化物半導体レーザであって、スロープ効率が $2.1 / n [\text{W}/\text{A}]$ 未満であり、前記活性層の微分利得 $d g / d n$ が、

$d g / d n \geq 1.0 \times 10^{-20} (\text{m}^2)$

であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【23】【15】乃至【22】いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、フォトルミネッセンスピーカー波長分布が 4.0 meV 以下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【24】【15】乃至【23】いずれかに記載の窒化物半導体レーザであって、前記基板は、表面転位密度が 10^8 個/ cm^2 未満の窒化ガリウム系半導体基板であることを特徴とする窒化物半導体レーザ。

【0022】上記窒化物半導体レーザのうち、【1】～

【14】は低出力仕様、低消費電力用途向けの半導体レーザである。このレーザは、たとえば DVD 用途に用いる場合、読み込み専用の携帯型装置等に好適に用いられる。一方、【15】～【24】は高出力仕様の半導体レーザであり、たとえば DVD 用途に用いる場合、書き込み可能な装置等に好適に用いられる。

【0023】本発明は、活性層の In 組成分布やバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎ等を所定範囲に規定するものである。活性層の組成分布やバンドギャップエネルギーの「揺らぎ」には、巨視的スケールにおける揺らぎと、微視的スケールにおける揺らぎがある。巨視的スケールにおける揺らぎとは、たとえば顕微 PL (フォトルミネッセンス) 測定等により測定可能な距離スケールの揺らぎである。一方、微視的スケールにおける揺らぎとは、これよりも近距離の揺らぎを意味する。従来技術における「揺らぎ」とは、上記巨視的スケールにおける揺らぎ、すなわち、PL 測定により観測される揺らぎを意味するのが一般的であり、測定の原理上、 $1 \mu\text{m}$ 程度以上の距離スケールにおけるゆらぎを意味していた。

【0024】前述した特開平 11-340580 号公報に記載されているのも上記巨視的スケールにおける揺らぎであり、これを低減させることにより多波長発振の防止を図っている。しかしながら、多波長発振が起こるということは、相当程度の In 組成揺らぎが存在することを意味しており、しきい値電流を制御する等の目的のためには、巨視的揺らぎをさらに低減するとともに、微視的揺らぎについて制御することが不可欠となる。

【0025】微視的領域における揺らぎを制御することについての検討はこれまで報告された例はなく、かかる揺らぎが素子性能に与える影響は知られていないかった。また、このような微視的揺らぎを低減する具体的手段についての知見は得られていなかった。巨視的スケールにおける揺らぎを低減するためには、上記特開平 11-340580 号公報に記載されているように基板の転位密度の低減や、活性層の成膜速度の調整によって、ある程度実現することも可能である。しかしながら、本発明のように微視的揺らぎを低減するには、このような手段のみでは実現困難であり、さらに高度な結晶成長の制御が必要となる。

【0026】以上のように本発明に係る窒化物半導体レーザは、従来、着目されることのなかつた微視的スケールにおける発光層組成分布やバンドギャップエネルギーの揺らぎを制御し、あるいは、微分利得を一定範囲としている。微視的スケールにおける発光層組成分布やバンドギャップエネルギーの揺らぎとは、キャリア拡散長

(約 $1\mu\text{m}$)よりも短距離スケールにおける揺らぎといふ意味である。実施例2および図15(カソードルミネッセンス像)で後述するように、本発明では、サブミクロンオーダー、具体的には 500nm 以下のスケールにおける微視的揺らぎを制御し、これにより発光層の局所歪みを好適範囲に制御してしきい値電流の低減を図っている。

【0027】さらに本発明では、上記微視的揺らぎについて、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得やレーザ内部損失の大きさに応じて、その最適範囲を規定している。すなわち、高出力仕様のレーザに関しては、たとえばしきい値モード利得を一定値以下の領域で微視的揺らぎが所定範囲内にある半導体レーザを提案し、一方、高出力仕様のレーザに関しては、たとえばしきい値モード利得が一定値を超える領域で微視的揺らぎが所定範囲内にある半導体レーザを提案するものである。

【0028】本発明に係る窒化物半導体レーザは、しきい値電流密度が低く、消費電力が低い。したがって光ディスク用光源等の用途に好適に用いることができる。以下、本発明による窒化物半導体レーザのしきい値電流密度が低減される理由を説明する。

【0029】本発明者らは、まず第一にInGaN量子井戸活性層における混晶組成揺らぎがレーザ素子のしきい値電流密度に及ぼす効果を明確にするため、理論的な研究を行った。まず、In組成揺らぎによるバンドギャップの空間変化を正規分布と仮定し、その標準偏差 σ_g を組成揺らぎの指標と考えた。そして、これに対応して、バンドオフセット比(3:7)に応じて、電子と正孔のポテンシャルが空間分布していると考えた。電子、正孔ともにパラボリックな分散関係を考え、電子については $n=1$ の量子準位のバンド、正孔についてはAバンドとBバンドの $n=1$ の量子準位のバンドを考慮し、電子、正孔の状態密度を計算した。すると、揺らぎがない場合には鋭い立ち上がりの階段関数となる量子井戸の状態密度が、揺らぎがある場合には立ち上がりが緩やかな誤差関数になることが示される。このように、定量化された電子および正孔の状態密度を用いると、様々な組成揺らぎをもつ量子井戸について光学利得特性を計算することができる。

【0030】本発明者らは、電流注入時にキャリア(電子および正孔)のフェルミエネルギーが空間的に一様であると仮定して、光学利得の計算を行った。この仮定は組成揺らぎの空間的なスケールを意識して行ったものである。すなわち、電流注入時にフェルミエネルギーが空間的に一様であるという仮定は、キャリアの拡散長に比べて組成揺らぎの空間的スケールが小さいことを意味する。キャリアの拡散長が 1mm 程度であるとすれば、組成揺らぎはサブミクロン以下のスケールでなければならぬ。実際に、秩父他がAppl.Phys.Lett., vol. 71 p. 2346(1997)で報告しているように、InGaN量子井戸のCL測定などで観察されるIn組成揺らぎのスケールは数十～数百nm

程度であり、上記の仮定が妥当なものであると考えている。

【0031】図1には揺らぎが小さい場合($\sigma_g=3\text{meV}$)、図2には揺らぎが大きい場合($\sigma_g=75\text{meV}$)のInGaN量子井戸について、室温(300K)での光学利得スペクトルのキャリア密度依存性を計算した結果を示す。まず、 $1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ のキャリア密度に着目すると、揺らぎの小さい場合には利得はまだ生じていないが、揺らぎが大きい場合にはすでに利得が生じていることがわかる。これは、揺らぎが大きい場合に、揺らいだポテンシャルの谷にキャリアが流れ込むことによって、狭い領域にキャリアが集中し、その領域で反転分布が実現していることに対応する。実際に図2に見られるように、利得は平均バンドギャップエネルギー(E_{G0})よりも低エネルギー側の局在状態で生じている。この場合、反転分布が起こり利得が生じている領域は空間的に狭い領域であるが、反転分布の実現していない領域で吸収損失が生じることはなく、この領域が光に対して透明となることが前述のモデルから理論的に証明できる。そのため、一部の領域で生じた利得が全体で見てもそれなりの値の利得として観測されることになる。しかしながら、このような小さな領域

(状態密度)での利得はすぐに飽和するため、図2で見られるように、キャリア密度を増加させたときの利得の増加(すなわち微分利得)は小さく、また、利得のピークは徐々に高エネルギー側にシフトしていく。これに対し、揺らぎが小さい場合には透明キャリア密度がある程度大きいが、状態密度の急峻な立ち上がりを反映し利得スペクトルは狭く微分利得も大きくなる。

【0032】図3に、様々な揺らぎ(σ_g)をもつInGaN量子井戸についての最大光学利得のキャリア密度依存性の計算結果を示す。前述のように、揺らぎの大きい系では透明キャリア密度が小さくなるという点で有利であるが、微分利得が小さいという欠点をもつ。しきい値キャリア密度という観点から揺らぎの存在が有利であるか否かは、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得に依存する。図3の計算結果によれば、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12cm^{-1} 以下の場合には揺らぎが大きい方がしきい値キャリア密度が小さくなるが、逆に量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12cm^{-1} を超える場合には揺らぎが小さい方が有利となっている。量子井戸一個あたりのしきい値モード利得は内部損失、共振器ミラーの反射率、量子井戸数に依存するため、レーザ素子の設計によってIn組成揺らぎの功罪が入れ替わることになる。

【0033】以上述べたように、In組成揺らぎには、透明キャリア密度を下げるという利点と、微分利得を下げるという欠点があり、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得の大きさによって両者の効き方が変わり、それによって活性層に望ましい揺らぎの度合いが決まってくる。これまでに、In組成揺らぎがLD特性に及ぼす効果

についてはChow他がAppl. Phys. Lett., vol. 71p. 2608(1997)の中で理論予測を報告しているが、彼らは揺らぎが利得スペクトルを広げる効果を取り扱っているだけで、揺らぎにより透明キャリア密度を下げる効果は無視している。したがって、彼らの結果では組成揺らぎは、レーザ特性に悪影響を及ぼす因子として扱われている。

[0034]組成揺らぎの空間的なスケールがミクロンオーダー以上と大きい場合には、キャリアがポテンシャルの谷に集まることができず、彼らの計算のような描像になると考えられる。しかし、ミクロンスケールでは均一組成だがサブミクロンスケールで揺らぎが存在しているような活性層では、前述のような描像となり、微視的揺らぎの存在がレーザ特性向上に寄与し得る。実際、サブミクロンスケールの組成揺らぎが、前述の秩父他の報告などによって実証されており、このような描像が実現しているものと考えられる。本発明で議論するIn組成揺らぎは上記のサブミクロンスケールの揺らぎであり、ミクロン以上のスケールの揺らぎではない。

[0035]図4と図5には、しきい値電流密度の揺らぎ依存性を示す。図4は共振器の片面(光出射側と逆側の面)のみをHRコートした場合、図5は共振器の両面をHRコートした場合の計算結果である。いずれにおいても、活性層は3個の量子井戸からなり、内部損失は 15 cm^{-1} としてある。ミラー損失は、片面HRコートで 20 cm^{-1} 、両面HRコートで 1 cm^{-1} とした。光閉じ込め係数を一井戸あたり1%とすると、片面HRコートの場合は量子井戸一個あたりのしきい値モード利得 14 cm^{-1} 程度に相当し、両面HRコートの場合は量子井戸一個あたりのしきい値モード利得 6 cm^{-1} 程度に相当する。図4では、In組成揺らぎの度合いが小さいほどしきい値電流密度が低減しており、特に揺らぎの標準偏差を 40 meV 以下にすることによって顕著なしきい値低減効果が予測される。一方、図5では、In組成揺らぎを大きくした方がしきい値が下がり、揺らぎの標準偏差を $75\sim200\text{ meV}$ にすることによって顕著なしきい値電流密度低減効果が現れ、しきい値電流密度は 1 kA/cm^2 以下に下がることが予測される。

上記の計算例以外の場合においても、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12 cm^{-1} よりも大きな値である場合には揺らぎの標準偏差を 40 meV 以下にすることによってしきい値電流密度が低減され、一方、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12 cm^{-1} 以下である場合には揺らぎの標準偏差を $75\sim200\text{ meV}$ にすることによってしきい値電流密度が低減されることが示される。

[0036]以上のように、しきい値モード利得(1井戸あたり)が 12 cm^{-1} 以下の場合に揺らぎを $75\sim200\text{ meV}$ にするとしきい値キャリア密度が低減する。しきい値電流密度はしきい値キャリア密度に比例する量であるから、しきい値モード利得(1井戸あたり)が 12 cm^{-1} 以下で揺らぎ $75\sim200\text{ meV}$ のときにしきい値電流密度が低減される。

[0037]ここで、上記議論では、しきい値キャリア密度としきい値電流密度が1対1に対応するものとして取り扱った。ところが、これらは厳密には1対1に対応する量ではない。正しくは、しきい値電流密度は、[(しきい値キャリア密度) / (キャリアの再結合寿命)]に比例するので、キャリア再結合寿命もしきい値電流密度に関係する。以下、この点を考慮した取り扱いを示す。

[0038]キャリア再結合寿命は、窒化物半導体の場合、主に非輻射再結合寿命と一致すると考えられており、非輻射再結合寿命を長くすることが、キャリア寿命を長くし、しきい値電流密度の低減につながる。ところで、In組成揺らぎはキャリアが欠陥に捕まるのを抑制するので、非輻射再結合寿命を長くする効果がある。しかし、揺らぎが大きい場合でも、キャリア密度が大きくなるとキャリアがポテンシャルの谷を埋め尽くし外にまで溢れてしまうので、欠陥に捕まりやすくなり、非輻射再結合寿命は短くなる。これを具体的に計算した結果を図7に示す。図からわかるように、揺らぎが $75\sim200\text{ meV}$ の範囲の場合、キャリア密度が $1.5 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 未満で、非輻射再結合寿命が顕著に長くなっている。そして、図3からわかるように、しきい値モード利得が 8 cm^{-1} 以下であれば、揺らぎ $75\sim200\text{ meV}$ ではしきい値キャリア密度 $1.5 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 以下が実現される。以上のことから、しきい値モード利得(1井戸あたり) 12 cm^{-1} 以下ではしきい値キャリア密度の低減によりしきい値電流密度が低減される効果があるが、 8 cm^{-1} 以下になると、さらにキャリア寿命が長くなる効果が加わって、より顕著にしきい値電流密度の低減が起こることがわかる。

[0039]次に、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得とレーザ素子構造の関連について述べる。しきい値モード利得は内部損失とミラー損失の和になる。InGaN系LDでは量子井戸1個あたりの光閉じ込め係数が1%と見積もられるので、n個の量子井戸を活性層にもつレーザ素子では、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 12 cm^{-1} よりも大きな値であるということは、内部損失 α_i が、

$$\alpha_i > 12 \times n - \alpha_m$$

を満たすことに対応する。逆に、 12 cm^{-1} 以下であることは、内部損失 α_i が、

$$\alpha_i \leq 12 \times n - \alpha_m$$

を満たすことに対応する。なお、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得が 8 cm^{-1} 以下であるということは、内部損失 α_i が

$$\alpha_i \leq 8 \times n - \alpha_m$$

さらに、量子井戸一個あたりのしきい値モード利得は、内部損失を通じてスロープ効率とも対応付けられる。波長 400 nm の半導体レーザでは、理論限界のスロープ効率が 3 [W/A] となるが、実際の素子におけるスロープ効率Sは、次式のように、 3 [W/A] に所定のファク

タを乗じた値となる。

【0040】

$$S = 3 \times \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

【0041】この式と前記した $\alpha_i > 1.2 \times n - \alpha_m$ から、下記式が導かれる。

$$S < 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

【0043】 R_1, R_2 の通常とり得る範囲を考慮し、共振器長を 1 mm 以下すると、上式は、 $S < 2.1/n$ [W/A] となる。また、前記した $\alpha_i \leq 1.2 \times n - \alpha_m$ から、下記式が導かれる。

$$S \geq 3 \times \frac{\alpha_m}{12 \times n} \times \frac{(1 - R_1)\sqrt{R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}$$

【0045】 R_1, R_2 の通常とり得る範囲を考慮し、共振器長を 200 μm 以上すると、上式は、 $S \geq 1.4/n$ [W/A] となる。

【0046】一方、バンドギャップエネルギー揺らぎの標準偏差は、In 組成揺らぎや微分利得と換算可能である。In_xGa_{1-x}N 中の In 組成微視的揺らぎの標準偏差 Δx と上述したバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差の標準偏差 σ との関係を次に説明する。Osamura らがジャーナル・オブ・アプライドフィジックス、第 46巻、3432 頁、1975 年に述べているように、In_xGa_{1-x}N のバンドギャップエネルギーは、

$$E_g(x) = 3.40(1-x) + 2.07x - 1.0x(1-x)$$

(単位 eV) と表される。この式を用いると、青色レーザーダイオードの活性層に用いる InGaN の組成の範囲 ($x = 0.15$ 近傍 : $x = 0.1 \sim 0.3$ 程度) では、 $dE/dx = 0.6$ (eV)

となる。したがって、In 組成 x の空間分布の標準偏差 Δx とバンドギャップエネルギーの標準偏差 σ_g との関係は、

$$\Delta x = \sigma_g / 0.6 \text{ (eV)}$$

となる。この関係により、前述の「バンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差の標準偏差が 40 meV 以下であること」は「In 組成微視的揺らぎの標準偏差 Δx が 0.067 以下であること」に言い換えることができ、「バンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差の標準偏差が 75 ~ 200 meV であること」は「In 組成微視的揺らぎの標準偏差 Δx が 0.125

【数9】

【0042】

【数10】

【0044】

【数11】

～0.333 であること」と言い換えることができる。

【0047】なお、これまで述べた事項については、In_xAl_yGa_{1-x-y}N ($0 < x < 1, 0 \leq y \leq 0.2$) 発光層を備えた素子に共通にあてはまるが、本発明における発光層は、特に、In_xAl_yGa_{1-x-y}N ($0 < x \leq 0.3, 0 \leq y \leq 0.05$)、あるいは、In_xGa_{1-x}N ($0 < x \leq 0.3$) の組成を有するものとすることが好ましい。

【0048】また、バンドギャップエネルギー揺らぎの標準偏差は微分利得と対応付けられる。図 6 は揺らぎの標準偏差と微分利得の関係を前述の理論モデルに基づいて計算した結果である。図より、揺らぎが大きいほど微分利得が小さくなるのがわかる。揺らぎが大きい場合、バンド端での状態密度の立ち上がりが緩やかになるので、キャリア注入による利得飽和が起こりやすく微分利得は小さな値となる。これに対し、揺らぎが小さい場合には、量子井戸の 2 次元性による階段関数の状態密度が有効となり、大きな微分利得が得られる。このような機構によって、組成揺らぎの度合いと微分利得の対応関係が生じている。図 6 より、揺らぎの標準偏差が 40 meV での微分利得が $1.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ($1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$) に対応していることから、前述の「揺らぎの標準偏差が 40 meV 以下であること」は「微分利得が $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 以上であること」と言い換えることもできる。また、図 6 より「揺らぎの標準偏差が 75 ~ 200 meV であること」は「微分利得が $0.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 以上 $0.7 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 以下」に対応する。

【0049】次に、本発明と従来技術との関係について説明する。ここでは従来技術の代表例として、従来技術 1 (IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 3, NO. 3, JUNE 1997 に記載)、従来技術

2、3(特開平11-340580号公報に記載)を挙げ、これらと本発明との関係について説明する。

【0050】まず本発明は、基板として窒化ガリウム系材料またはサファイアを用いた上で、活性層の組成分布やバンドギャップエネルギーの揺らぎを規定している。基板としてSiCを用いる技術もあるが、本発明においてはSiCを使用すると、しきい値電流を安定的に充分に低減することが困難となる。SiC、サファイアおよびGaN系半導体の熱膨張率の大小関係は、

サファイア>GaN系半導体>SiC

となっている。このため、SiC基板上にGaN系半導体層を成膜後、冷却すると、基板に拘束されたGaN系半導体層の水平面内に引っ張り歪みが残存する。したがって、SiC基板を用いた半導体レーザでは、一般に、活性層に引っ張り熱歪みが残存する。引っ張り歪みが残存した場合、組成揺らぎ、特に微視的揺らぎを安定的に調節することが困難となりやすい。

【0051】これに対してサファイア基板を用いた場合は、GaN系半導体層の水平面内には圧縮熱歪みが残存することとなる。圧縮歪みに対する半導体層の強度は、引っ張り歪みに対する強度よりも高いことから、この場合は、組成揺らぎを比較的安定に調節できる。また、GaNやAlGaNからなる基板を用いた場合は、基板とその上に形成されるGaN系半導体層が等しい熱膨張率を有するため、GaN系半導体層中の残存熱歪みはほとんど発生しない。このため、組成揺らぎ、特に微視的揺らぎを安定的に調節することができる。

【0052】以上のことから、本願発明では基板として窒化ガリウム系材料またはサファイアを用いている。

【0053】次に揺らぎや利得の数値範囲について本発明と従来技術とを対比した結果を示す。従来技術1に記載された半導体レーザの構造を図16に示す。このレーザはサファイア基板を用いた一般的な窒化ガリウム系レーザの構造を示すものである。サファイア基板上に、GaNバッファ層を介して、AlGaNクラッド層、InGaN多重量子井戸(MQW)活性層が形成された層構造となっている。

【0054】従来技術2、3には、SiC基板を用いた窒化ガリウム系半導体レーザが開示されている。上記公報には、従来の半導体レーザは、共振器内の活性層のフォトルミネッセンス波長の分布が150meV程度である(これを従来技術2とする)のに対し、同公報記載の発明では90meV以下程度に低減されている(これを従来技術3とする)と記載されている。SiC基板を用いる理由については、同公報の段落161に以下のように記載されている。すなわち、「従来の短波長半導体レーザにおいては、ナイトライド系化合物半導体との格子不整合が13%程度と非常に大きなサファイアを成長基板として用いていたため、共振器内の活性層の転位密度は 10^{10} cm^{-2} 程度であるが、ナイトライド系化合物半

導体においては、転位は非発光中心を形成しないのでデバイスの特性には影響しないと言われているので、この様な転位密度を全く問題にせずにデバイス化が進められていたが、上述の様に、転位密度と組成不均一が相関を示し、転位密度が小さくなると組成不均一も小さくなるので、格子不整合が3%と大幅に低減されるSiC基板を用いることにより、転位密度を 10^9 cm^{-2} 以下に、少なくとも、 10^7 cm^{-2} 程度までは低減することができ、それによって、多波長発振の抑制された短波長半導体発光素子を実現することができる。」と記載されている。

【0055】本発明に係る低出力仕様の半導体レーザの一例と上記従来技術との関係を図13および図14に示す。図中、ハッチングを施した領域が本発明に係る窒化物半導体レーザを含む領域である。

【0056】図13は、横軸をIn組成の微視的揺らぎ(サブミクロンオーダーの揺らぎ)、縦軸をIn組成の巨視的揺らぎ(PL波長分布；1ミクロン以上の距離スケールの揺らぎ)としたものである。従来技術1には、微分利得が $5.8 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ と記載されており、これは、活性層バンドギャップの巨視的揺らぎに換算すると約100meVとなる。

【0057】従来技術では、いずれも巨視的揺らぎが大きくなっている。従来技術1には巨視的揺らぎについての言及はないが、レーザ構造およびその作製プロセスを考えると、従来技術2や3と同様の一般的な水準にあるものと考えられる。これに対して本発明に係る半導体レーザの一例を示す図中斜線の領域は、40meV以下と従来技術に比べて低い巨視的揺らぎとなっている。

【0058】図14は、横軸をIn組成の微視的揺らぎ(サブミクロンオーダーの揺らぎ)、縦軸を一量子井戸あたりのしきい値モード利得(cm^{-1})としたものである。従来技術では、いずれも一量子井戸あたりのしきい値モード利得が大きくなっている。従来技術に係る窒化ガリウム系半導体レーザの内部損失は、通常、 40 cm^{-1} 程度以上であり、量子井戸数が3以下であれば、ミラー損失を考慮すると一量子井戸あたりのしきい値モード利得は 14 cm^{-1} 以上となる。これに対して本発明は、内部損失を抑えるための手段(実施例等で後述)を採用することにより、一量子井戸あたりのしきい値モード利得を 12 cm^{-1} 以下あるいは 8 cm^{-1} 以下に抑えている。

【0059】次に本発明に係る高出力仕様の半導体レーザの一例と上記従来技術との関係を図17および図18に示す。図中、ハッチングを施した領域が本発明に係る窒化物半導体レーザを含む領域である。

【0060】図17は、横軸をIn組成の微視的揺らぎ(サブミクロンオーダーの揺らぎ)、縦軸をIn組成の巨視的揺らぎ(PL波長分布；1ミクロン以上の距離スケールの揺らぎ)としたものである。従来技術では、巨

視的揺らぎおよび微視的揺らぎとともに大きくなっている。

【0061】図18は、横軸をIn組成の微視的揺らぎ（サブミクロンオーダーの揺らぎ）、縦軸を一量子井戸あたりのしきい値モード利得（cm⁻¹）としたものである。従来技術では微視的揺らぎが大きくなっている。

【0062】

【発明の実施の形態】本発明における発光層のバンドギャップエネルギーやIn組成の微視的揺らぎに関し、その測定方法について説明する。前記したように、従来、In組成揺らぎを測定する方法として顕微PL測定が利用されてきたが、これではサブミクロンオーダーの微視的揺らぎを観測することは困難である。そこで本発明者らは、サブミクロンオーダーの微視的揺らぎを観測できる手法を見出した。以下、詳細に説明する。図8は、前述の図9に示す半導体レーザに対して、発光寿命の温度変化を測定した結果である。発光寿命は次のように測定した。まず、半導体レーザ試料にピコ秒チタンサファイアレーザの第2高調波（波長370nm、出力5mW、繰り返し周波数80MHz）の光を表面から照射して励起

$$\tau_{PL}^{-1} = \tau_0^{-1} + A T^{1/2} e \times p \quad (-T_0/T) \quad (1)$$

という式でフィッティングができる。ここで、 τ_{PL} は発光寿命、Tは温度、 τ_0 、A、 T_0 はフィッティングのパラメータである。上記の式は次のように説明される。温度が低い場合には、電子は揺らぎによるポテンシャルの谷に捕まってほとんど動けないため、そこで固有の寿命 τ_0 によって再結合する。低温では上式の第二項は効かず、第一項のみが効くので発光寿命は τ_0 で一定となる。温度が高くなると、電子の熱励起が起こるが、揺らぎによるポテンシャル障壁の大きさをkT₀（kはボルツマン定数）とすれば、励起されるキャリアの割合は $e \times p \quad (-T_0/T)$ に比例する。そして、励起されたキャリアの一部は熱速度で動き回っている間に欠陥（非輻射中心）に捕獲される。この捕獲の確率は、Nvsで表される。ここで、Nは欠陥密度、vは熱速度、sは捕獲断面積を表す。温度依存性のみに着目すると熱速度が温度の平方根に比例することより、 $Nvs = A T^{1/2}$

と記述できる。したがって、温度が高くなると、上記のメカニズムによって、非輻射再結合が活発化するため、キャリアの再結合速度は、 $A T^{1/2} e \times p \quad (-T_0/T)$ 、すなわち式(1)の第二項によって増加することになる。このように、フィッティングによって求められるパラメータ T_0 はIn組成揺らぎの度合いの指標となるパラメータとなる。図8ではフィッティングにより T_0 は460Kと求められる。

【0063】次に、パラメータ T_0 と実際のバンドギャップエネルギー揺らぎの関係について述べる。 kT_0 は電子が自由に動けるために必要な熱エネルギーの大きさなので、空間的に分布する電子のポテンシャル微視的揺

した。発光はレンズで分光器に集光し、分光された光を光電子増倍管で検出し、単一光子計数法によって時間分解測定を行った。時間分解測定はストリームカメラを用いて行うこともできる。温度は、液体ヘリウムを用いた温度可変クライオスタットにより、5Kから300Kの範囲で変化させた。発光寿命の温度変化はバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差と関係している。微視的揺らぎがある場合、光励起された電子はIn組成微視的揺らぎによって形成されたポテンシャル微視的揺らぎの谷に捕まるため、自由に動けなくなり、欠陥（非輻射中心）に捕まる確率が減り、発光寿命は長い値となる。しかし、温度が高くなり、熱エネルギーによって微視的揺らぎによるポテンシャル障壁を超えることができるようになると、電子は自由に動けるようになり非輻射中心に捕まる確率が急増し、発光寿命も急激に短くなる。図8で100K程度から発光寿命が短くなり始めているのは、この温度以上で熱励起の効果が効き始めているからであると説明できる。定量的には、図8の曲線は

らぎと比例関係にあるはずである。量子井戸のような2次元系においてポテンシャル微視的揺らぎがある場合、ポテンシャルの空間的な平均値以下のエネルギーの電子は局在し（すなわち自由に動けない）、平均値以上のエネルギーをもつ電子は自由に動けることが、古典的なパーコレーション理論から導かれる。したがって、 kT_0 はポテンシャルの谷底から平均ポテンシャルまでのエネルギーと考えられる。ポテンシャルの空間分布が正規分布であるとし、その標準偏差を σ_e とすると、ポテンシャルの谷は平均値から $2\sigma_e$ 程度低エネルギー側にあるので、 $\sigma_e = 0.5 kT_0$ となることが導かれる。InGaNのバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差（標準偏差： σ_g ）は、伝導帯（電子）のポテンシャル微視的揺らぎと価電子帯（正孔）のポテンシャル微視的揺らぎを加えたものになるので、「アプライド・フィジックス・レターズ(APPLIED PHYSICS LETTERS)、第68巻、2541頁、1996年」においてMartinらが述べているように、InGaN系の伝導帯と価電子帯のバンドオフセット比を3:7とすると、 $\sigma_g = 3.33\sigma_e = 1.67 kT_0$ となる。この式を用いることによって、実験から求められる T_0 から、InGaNのバンドギャップエネルギーの揺らぎ（標準偏差 σ_g ）を求めることができる。図8の場合、バンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差の標準偏差 σ_g として、66meVという値が得られる。

【0064】図9の半導体レーザについて1μmの微小スポット径でPL測定をした結果からは、PLピーク波長の分布が±1nmに入っており、1μmを超えるサイズのIn組成揺らぎが存在しなかった。ところが、発光寿命の

温度依存性から求める方法で測定した場合には、バンドギャップエネルギーの揺らぎが観測される。このことから、図9の半導体レーザに代表される従来の半導体レーザでは、PL測定では観測にかからない微視的揺らぎ、すなわち、サブミクロンオーダーの揺らぎが存在していることがわかる。

【0065】本発明においてIn組成やバンドギャップエネルギーの巨視的揺らぎを低減するための具体的手段として、アンモニア分圧を低くすることが有効である。たとえばアンモニア分圧を110hPa以下とし、窒化ガリウム系半導体層の成長速度を適切に選択することによりバンドギャップエネルギーの巨視的揺らぎを20meV以下とすることができます。

【0066】このように巨視的揺らぎを低減した上でバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差を7.5~200meVとするには、上記のようにアンモニア分圧を低くしてレーザ構造を形成した後、比較的高温による加熱処理を行うことが有効である。熱処理温度は、850°C以上とし、より好ましくは900°C以上とする。上限についてはたとえば1200°C以下とする。処理時間は、通常、40分以上必要となる。この熱処理は、In組成の微視的揺らぎを形成するためのものであり、電極形成時のアニールのように低温による穏やかな熱処理では目的を果たすことが困難である。

【0067】本発明において、内部損失を減らし量子井戸一個あたりのしきい値モード利得を低減するために、p型SCH(Self Confinement Heterostructure)層をノンドープとし、成長温度をたとえば1100°C以上と高くすることが有効である。これにより内部損失を減らすことができる。一般にSCH層のp型ドープにはMgが用いられるが、Mgドープした場合、結晶性が低下するとともに不純物準位が形成され、内部損失の低下をもたらす原因となる。この影響を排除し、さらに成長条件を適切に選択することによって内部損失を有効に低減できる。

【0068】本発明において、フォトルミネッセンスのピーク波長分布(最大波長と最小波長の差)は、好ましくは40meV以下、より好ましくは20meV以下とする。このようにすることによってしきい値電流をより効果的に低減できる。この値が大きすぎると、しきい値電流が大きくなつて消費電力が大きくなる。

【0069】本発明において、発光層のバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差は、好ましくは7.5~200meV、より好ましくは80~150meVである。また、In組成xの微視的揺らぎの標準偏差は、好ましくは0.125~0.333、より好ましくは0.133~0.266とする。このようにすることによって半導体レーザのしきい値電流をより効果的に低減できる。

【0070】本発明において、「発光層におけるIn組

成の微視的揺らぎ」、および、「バンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差」とは、空間分布における揺らぎ(変動)をいう。また、「微視的揺らぎ」とは、前述したように、サブミクロオーダー以下の揺らぎをいう。従来行われていたPL測定では、通常、スポット径が1μm以上であり、測定の原理上、1μm以上の距離スケールにおけるゆらぎが観測されていた。これに対し本発明における微視的揺らぎとは、この方法では観測し得ない狭い領域内の揺らぎをいう。

【0071】本発明において、活性層を多重量子井戸構造とする場合、上記揺らぎは、各量子井戸層全体にわたる揺らぎを意味する。

【0072】本発明における基板とは、レーザ等を構成する層を成長させる際に下地となる基板をいう。基板の表面転位密度とは、基板表面に存在する貫通転位の密度をいう。

【0073】表面転位密度が10⁸個/cm²未満の窒化ガリウム系半導体基板は、以下に示すFIELO(Face t-Initiated Epitaxial Lateral Overgrowth)あるいはは20ペンディオエピタキシ法等により窒化ガリウム系半導体層を形成後、成長に用いたサファイア等の基板を除去することにより得ることができる。以下、これらの方法について説明する。

【0074】(FIELO)たとえば、サファイア等の基板上に薄いGaNを形成し、その上にストライプ状のSiO₂マスクを形成する。マスク開口部にGaNを選択横方向成長させることにより、表面転位密度の少ないGaN層が得られる。これは転位がSiO₂マスクでプロックされるだけでなく、選択横方向成長時に基板水平方向に曲げられる為である。この方法は、「応用物理 第68巻、第7号(1999年)第774頁~第779頁」等に記載されている。

【0075】(ペンディオエピタキシ法)たとえば、サファイア等の基板上に低温ハッファ層を形成した後、単結晶からなるGaN層を形成する。次いでマスクを用いて選択エッチングすることによりストライプ状に延びたGaNのパターンを形成する。このGaNストライプの上面または側面から結晶成長させることにより、表面転位密度の少ない下地層を形成することができる。ペンディオエピタキシ法については、たとえば「Tsvetankas.Zhelevaet. A. I.; MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 4S1, G3.38(1999)」等に記載されている。

【0076】また、以下のような手法を用いれば、さらに転位密度を低減した基板を得ることもできる。すなわち、サファイア基板上に直接、またはハッファ層を介して、窒化ガリウム系材料からなる単結晶層を形成する。次いで、この単結晶層をエッチングして離間した島状の形態とする。このような形態とされた単結晶層を起点として結晶成長させることにより、表面転位密度の少ない下地層を形成することができる。なお、上記島状の形態

50

は、エッチングによらず、単結晶層成長条件を適切に選択し、直接島状の形態を有する単結晶層を形成してもよい。

【0077】本発明における基板の表面転位密度は、 10^8 個/ cm^2 未満であるが、より好ましくは 10^7 個/ cm^2 以下とする。基板の転位密度が高いと、In組成やバンドギャップの微視的揺らぎを低減し、あるいは微分利得を向上させても、素子寿命を向上させることは困難である。表面転位密度を 10^8 個/ cm^2 未満、特に 10^7 個/ cm^2 以下とした場合は、上記微視的揺らぎの低減等による作用との相乗作用が得られ、良好な素子特性を維持しつつ素子寿命の向上を図ることができる。なお、基板の表面転位密度は、エッチピットを測定する、あるいは、断面部をTEM観察する等、公知の方法により測定することができる。このような低転位密度の基板は、上記島状の形態を有する単結晶層を形成し、これを起点として結晶成長を行うことにより実現することができる。

【0078】以上、低転位密度の窒化ガリウム系半導体基板について述べたが、基板としてサファイアを用い、その上に低転位密度の窒化ガリウム系半導体層を成長し、レーザ構造を形成した構成とすることもできる。この場合の窒化ガリウム系半導体層の転位密度の好ましい範囲、およびその測定方法は、上記したのと同様である。

【0079】本発明の下地層は窒化ガリウム系材料からなるものであるが、ここでいう「窒化ガリウム系材料」とは、AlGaN、GaN等、構成元素として窒素およびガリウムを含む材料をいう。ここで、下地層としてGaNまたはAlGaNを用いた場合、光閉じ込め率を良好にしつつ素子寿命の改善を図ることができる。窒化ガリウム系半導体レーザでは、通常、AlGaNからなるクラッド層が用いられるが、良好な光閉じ込め率を実現するためには、クラッド層のAl組成比を高く、膜厚を厚くすることが望まれる。たとえば光ディスク用途に用いる発光波長 $390 \sim 430\text{ nm}$ の半導体レーザにおいては、クラッド層の膜厚を $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上とすることが望ましく、Al組成比を、0.05以上、より好ましくは0.07以上とすることが望まれる。このような場合において、下地層としてGaNまたはAlGaNを選択することが有効となる。このようにすれば下地層とクラッド層の熱膨張係数や格子定数が近似することとなり、異種材料を下地層として用いた場合に比べ、クラッド層の残留歪みが低減するため、高温動作時における活性層の劣化を一層有効に防止できる。一方、クラッド層の膜厚やAl組成を所望の範囲とすることが可能となり、光閉じ込め率を良好にすることができます。

【0080】以上、本発明における基板について説明したが、発光層におけるIn組成やバンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差、微分利得が好適な範囲

にある窒化物半導体レーザを得るためにには、基板の選択だけでなく、発光層の成長条件等についても留意する必要がある。たとえば、発光層を、アンモニアガスを含む原料ガスを用いて有機金属気相成長法により形成するものとし、この際、アンモニアガスの分圧を 110 hPa 以下、より好ましくは 95 hPa 以下とすれば、上記微視的揺らぎ、微分利得が好適な範囲にある窒化物半導体レーザを得ることができる。

【0081】本発明における「発光層」とは、活性層中に含まれる層であって、反転分布により利得の発生する層をいうものとする。量子井戸構造の活性層においては、量子井戸層が本発明における発光層に相当し、量子井戸構造以外の構造の活性層では、通常、活性層全体が発光層となる。

【0082】本発明に係る低出力仕様のレーザにおいては、活性層の井戸数は3以下とすることが好ましい。しきい値電流の大きさは井戸数に依存するので、このようにすることによって消費電力を低減できる。また、量子井戸に対するキャリア注入を均一にできる。量子井戸数が4以上になると、キャリア、特にホールの注入が不均一となり、キャリア密度の不足した量子井戸において内部損失の低下が顕著となる。なお、この点に関し、Domenらは、Appl. Phys. vol. 73(1998), pp. 2775-2777において、井戸数が3の場合はキャリアの注入が均一となり、井戸数5の場合は不均一となることを報告している。

【0083】

【実施例】はじめに、実施例で作製した半導体レーザの反射率、ミラー損失、内部損失、しきい値モード利得の測定方法について述べる。

30 (i) 反射率

試作したレーザ共振器の反射率Rは、半導体の面をへき開しただけの場合 $R=(n-1/n+1)^2$ と表される（例えば末松安晴伊賀健一著光ファイバ通信入門オーム社）。但し、nは半導体の屈折率である。GaNの屈折率は波長によっても違うが典型的な窒化物半導体レーザ波長である 400nm では2.553程度であることが知られているので、反射率は19%となる。一方高反射ミラーを得るには通常誘電体多層膜を利用することが多い。これは、高い屈折率と低い屈折率の誘電体を交互に形成することで高い反射率を得ることが可能である。この時の反射率は使用する材料の屈折率と層厚と層数できまり、例えばTiO₂（屈折率2.31）とSiO₂（屈折率1.44）を 100nm づつ交互に形成した場合の反射スペクトルを図12に示した。

【0084】図12にあるように波長 400nm 付近で大きな反射率を有するスペクトルが得られた。これらのスペクトルは層数を増やすことで反射率を変えることができ、TiO₂/SiO₂のペアを1つ形成するとおよそ50%の反射が得られ、3つにすると90%以上の反射率が得られる。従って、コーティング材料と層厚が分かれば反射率の大きさを調べることが可能である。

【0085】形成された高反射コーティングの反射率を測定するもう一つの手段として、半導体レーザを使用することが考えられる。半導体レーザの端面の反射率R1、R2から出てくる光出力P1とP2の関係は、 $P1/P2=(1-R1)/(1-R2) \times (R2/R1)^{0.5}$ である。従って、P1とP2の光出力比と片方の反射率が分かればもう一つの反射率が分かる。特に片方がアンコートの場合19%の反射率が見込まれるのでこの方法は有効である。

(ii) ミラー損失

ミラー損失はレーザの発振条件と共振器の反射率R1、R2から求められる（例えば伊賀健一著「半導体レーザ」（オーム社））。レーザの共振器長をLとするとミラー損失 α_m は $\alpha_m=1/2L \times \ln(1/R1/R2)$ となる。従つて、共振器長とミラー反射率からミラー損失を求めるこ

$$P1 = \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \times \frac{(1-R_1)\sqrt{R_2}}{(1-\sqrt{R_1R_2})(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \times Vd \times (I - I_{th})$$

【0088】と表すことができる。ここで、Iは電流であり、 I_{th} はしきい値電流であり、Vdは接合電位である。Vdは発振波長に対応する光エネルギーをほぼ同じと考えて良く、反射率やミラー損失が分かっている素子に対しては、電流一光出力特性を調べれば内部損失が分かる。

(iv) しきい値モード利得

レーザは利得と損失が釣り合ったところで発振をおこなう。従つて、しきい値モード利得は内部損失とミラー損失の和で求めることができる。

【0089】実施例1

図11は本実施例に係る窒化物半導体レーザーの断面構造図である。前述のFIELDにより作製した、表面転位密度が 5×10^7 個/ cm^2 の低転位n-GaN基板21上にSiドープn型Al_{0.1}GaN_{0.9}N（シリコン濃度 4×10^{17} cm⁻³、厚さ1.2μm）からなるn型クラッド層22、Siドープn型GaN（シリコン濃度 4×10^{17} cm⁻³、厚さ0.1μm）からなるn型光閉じ込め層23、In_{0.2}GaN_{0.8}N（厚さ3nm）井戸層とSiドープIn_{0.05}GaN_{0.95}N（シリコン濃度 5×10^{18} cm⁻³厚さ5nm）バリア層からなる多重量子井戸層24（井戸数3個）、Mgドープp型Al_{0.2}GaN_{0.8}Nからなるキャップ層25、アンドープGaN（厚さ0.1μm）からなる光閉じ込め層26、Mgドープp型Al_{0.1}GaN_{0.9}N（Mg濃度 2×10^{17} cm⁻³、厚さ0.5μm）からなるp型クラッド層27、Mgドープp型GaN（Mg濃度 2×10^{17} cm⁻³、厚さ0.1μm）からなるp型コンタクト層28を順次成長させて、レーザ構造を形成した。レーザ構造の形成は、200hPaの減圧MOVPE（有機金属気相エピタキシ）装置を用いて行われた。窒素原料に用いたアンモニアの分圧は53hPaであり、GaN、Al、In材料はTMG、TMA、TMiを用いた。成長は、基本的には1050°Cで

とができる。

【0086】なお、通常の窒化物半導体レーザの高反射コートにはTiO₂/SiO₂などの誘電体多層膜ミラーが用いられ、反射率は80%以上である。この場合、両面HRコートの場合はミラー損失が 1 cm^{-1} 程度になる。また、片面HRコートの場合、共振器長が $400 \mu \text{m}$ 程度であれば、ミラー損失が 20 cm^{-1} 程度になる。

(iii) 内部損失

内部損失 α_i は電流一出力特性から調べることができ10る。反射率がR1、R2である半導体レーザにおいて、R1側から出る光出力P1は

【0087】

【数12】

行つた。ただし、InGaNからなる多重量子井戸活性層24では780°Cで、アンドープGaN（厚さ0.1μm）からなる光閉じ込め層26では1150°Cで成長を行つた。成長した試料を900°Cで1時間熱処理した後、ドライエッ칭によりp型クラッド層27そしてp型コンタクト層28を含んだメサ型29を部分的に残した後、SiO₂絶縁膜30を形成した。また、メサ部分の頭出しを露光技術により行い、リッジ構造を形成した。n型基板裏にはTi/AIからなるn電極31を形成し、pコンタクト上には、Ni/Auからなるp電極32を形成した。へき開によりレーザ共振器端面を形成し、両面をTiO₂/SiO₂で高反射コーティング（反射率80%）を行つた。共振器長は300μmとした。

【0090】「従来の技術」に記載した図9のレーザ素子（両面コート）と本実施例のレーザ素子の作製方法の相違点は（1）成長時のアンモニア分圧が低いこと、（2）成長後900°Cで1時間熱処理していること、（3）GaN（厚さ0.1μm）からなる光閉じ込め層26がアンドープであることと成長温度が1150°Cと高いことである。（1）は活性層量子井戸の微視的揺らぎ、巨視的揺らぎをともに小さくするための手法である。（1）で揺らぎの小さい量子井戸を作製した後に、（2）の熱処理を行うと、巨視的揺らぎを小さくしたままで微視的な揺らぎだけを大きくすることができるこ40とを、発明者らは今回見出した。また、発明者らは、GaN光閉じ込め層26での光吸収がレーザ素子の内部損失の主な原因となっていることを発見し、この層での光吸収を低減するために、結晶性の向上させるために成長温度を高くし、また、不純物準位を介した吸収を減らすためにMg添加を行わないことにした。得られた半導体レーザの諸特性を表1中のNO.1に示す。しきい値電流密度は、0.8kA/cm²と低く、良好な性能を示した。

【0091】上記のようにして作製した半導体レーザについて、以下の測定を行った。

- ①顕微PL測定（ $1 \mu\text{m}$ 分解能）による巨視的組成揺らぎの測定
- ②微分利得測定（緩和振動測定）による微視的組成揺らぎの測定
- ③CL（カソードルミネッセンス）観察による微視的組成揺らぎの測定

カソードルミネッセンスによる測定では、量子井戸活性層上にキャップ層を形成した段階で成長を止めて得た評価用サンプルを別途作製し、このサンプルに対し電子線を照射して分光しながら特定の波長でのマッピングを行なった。加速電圧は3kVとし、室温において測定を行った。

【0092】 $1 \mu\text{m}$ 分解能の顕微PLで観察した結果、P波長分布 20 meV 以下という結果が得られたが、緩和振動測定による測定の結果、微視的揺らぎは 100 meV と求まった。また、CL像では $400\sim500\text{ nm}$ の大きさの領域が観測された（図15）。以上のことから、本実施例で作製したレーザでは、巨視的な揺らぎはほとんど存在しないがサブミクロンオーダーの微視的な揺らぎが適度に存在することが分かった。

【0093】実施例2

本実施例に係る窒化物半導体レーザーの概略断面構造図を図11に示す。但し、本実施例では井戸数を1としているので、量子井戸層24の構造は図示したものと若干異なる。実施例1の半導体レーザは高出力仕様であるのに対し、本実施例では高出力仕様となっている。以下、この半導体レーザを作製した手順について説明する。まず、FIELO法により作製した表面転位密度が $5\times10^7\text{個}/\text{cm}^2$ の低転位n-GaN基板21上にSiドープn型Al_{0.1}Ga_{0.9}N（シリコン濃度 $4\times10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $1.2\mu\text{m}$ ）からなるn型クラッド層22、Siドープn型GaN（シリコン濃度 $4\times10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.1\mu\text{m}$ ）からなるn型光閉じ込め層23、In

{0.2}Ga{0.8}N（厚さ 3 nm ）井戸層とSiドープIn_{0.05}Ga_{0.95}N（シリコン濃度 $5\times10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 厚さ 5 nm ）バリア層からなる量子井戸層24（井戸数1個）、Mgドープp型Al_{0.2}Ga_{0.8}Nからなるキャップ層25、アンドープGaN（厚さ $0.1\mu\text{m}$ ）からなる光閉じ込め層26、Mgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}N（Mg濃度 $2\times10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.5\mu\text{m}$ ）からなるp型クラッド層27、Mgドープp型GaN（Mg濃度 $2\times10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.1\mu\text{m}$ ）からなるp型コントラクト層28を順次成長させて、レーザ構造を形成した。レーザ構造の形成は、 200 h Pa の減圧MOVPE（有機金属気相エピタキシ）装置を用いて行われた。窒素原料に用いたアンモニアの分圧は 53 h Pa であり、Ga、Al、In材料はTMG、TMA、TMIを用いた。成長は、基本的には 1050°C で行った。ただし、InGaNからなる多重量子井戸活性層24では 780°C で、アンドープGaN（厚さ $0.1\mu\text{m}$ ）からなる光閉じ込め層26では 1150°C で成長を行った。ドライエッチングによりp型クラッド層27そしてp型コントラクト層28を含んだメサ型29を部分的に残した後、SiO₂絶縁膜30を形成した。また、メサ部分の頭出しを露光技術により行い、リッジ構造を形成した。n型基板裏にはTi/Alからなるn電極31を形成し、pコンタクト上にはNi/Auからなるp電極32を形成した。へき開によりレーザ共振器端面を形成した後、光出射側と逆側の端面について、TiO₂/SiO₂で高反射コーティング（反射率95%）を行った。なお、光出射側端面についてはコーティング膜を形成せず、アンコートとした。共振器長は $500\mu\text{m}$ とした。

【0094】得られた半導体レーザの諸特性を表1中のNO.2に示す。しきい値電流密度は、 0.8 kA/cm^2 と低く、良好な性能を示した。

【0095】

【表1】

	NO. 1	NO. 2
用途	低出力用途	高出力用途
量子井戸数	3	1
共振器長 (μm)	300	500
量子井戸一個あたりのしきい値モード利得 (cm^{-1})	6.5	29
光出射側ミラー反射率 (%)	80 (HRコート)	19 (アンコート)
光出射側と逆側のミラー反射率 (%)	80 (HRコート)	95 (HRコート)
ミラー損失 (cm^{-1})	7.4	17
内部損失 (cm^{-1})	12	12
スロープ効率 (W/A)	0.57	1.7
In組成微視的揺らぎの標準偏差	0.167	0.0083
バンドギャップエネルギーの微視的揺らぎの標準偏差 (meV)	100	5
微分利得 $d g / d N (\times 10^{-6} \text{ m}^2)$	0.6	2.2
しきい値電流密度 (kA/cm^2)	0.8	0.8
フォトルミネッセンス波長分布 (meV)	19	17

【0096】

【発明の効果】以上述べたように、本発明によれば、半導体レーザのしきい値電流密度を飛躍的に低くすることができます。したがって、本発明により、光ディスク用光源として、実用可能な窒化物半導体レーザが実現できるようになり、産業上の利用価値は非常に大きい。

【図面の簡単な説明】

【図1】揺らぎの標準偏差が3meVの場合の利得スペクトルである。

【図2】揺らぎの標準偏差が75meVの場合の利得スペクトルである。

【図3】様々な揺らぎ (σ_g) をもつInGaN量子井戸についての最大光学利得のキャリア密度依存性の計算結果を示す図である。

【図4】しきい値電流密度の揺らぎ依存性を示す図である。

【図5】しきい値電流密度の揺らぎ依存性を示す図である。

【図6】揺らぎの標準偏差と微分利得の関係を計算した結果を示す図である。

【図7】キャリア密度と非輻射再結合寿命の関係を示す図である。

【図8】発光寿命の温度変化を測定した結果を示す図である。

【図9】従来の半導体レーザの構造を示す図である。

【図10】従来の半導体レーザの構造を示す図である。

20 【図11】実施例に係る半導体レーザの構造を示す図である。

【図12】TiO₂とSiO₂を交互に形成した多層膜の反射スペクトルである。

【図13】本発明に係る半導体素子と従来の半導体素子の関係を示す図である。

【図14】本発明に係る半導体素子と従来の半導体素子の関係を示す図である。

【図15】カソードルミネッセンスの観察結果である。

【図16】従来の半導体レーザの構造を示す図である。

30 【図17】本発明に係る半導体素子と従来の半導体素子の関係を示す図である。

【図18】本発明に係る半導体素子と従来の半導体素子の関係を示す図である。

【符号の説明】

21 n-GaN基板

22 n型クラッド層

23 n型光閉じ込め層

24 量子井戸層

25 キャップ層

26 光閉じ込め層

27 p型クラッド層

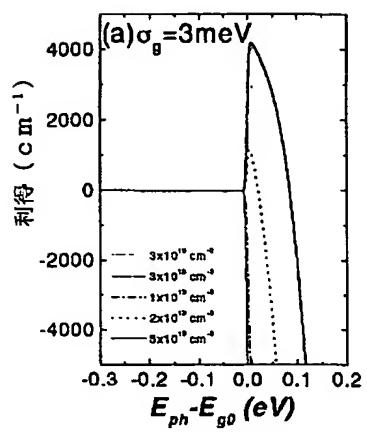
28 p型コンタクト層

29 メサ型

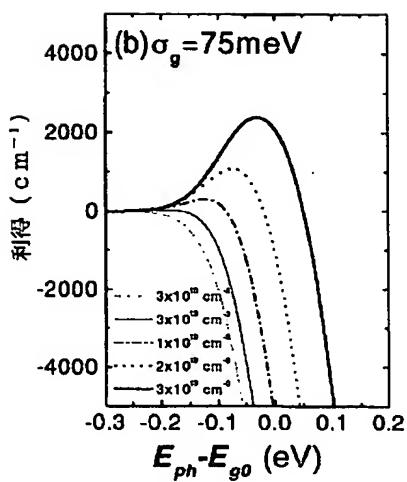
30 SiO₂絶縁膜

31 n電極

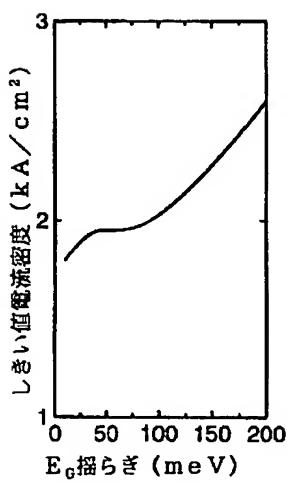
【図1】



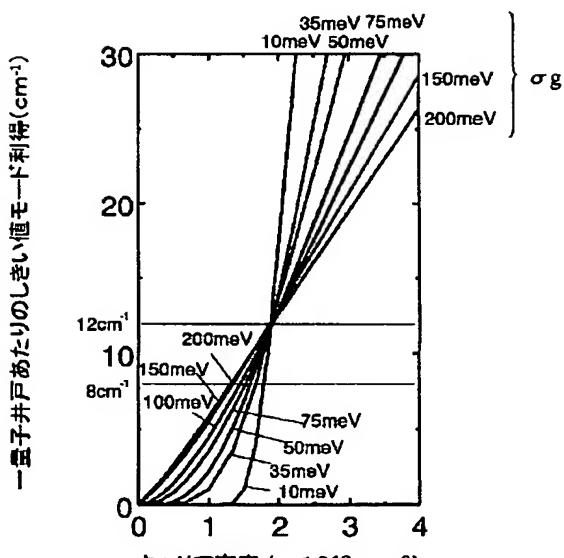
【図2】



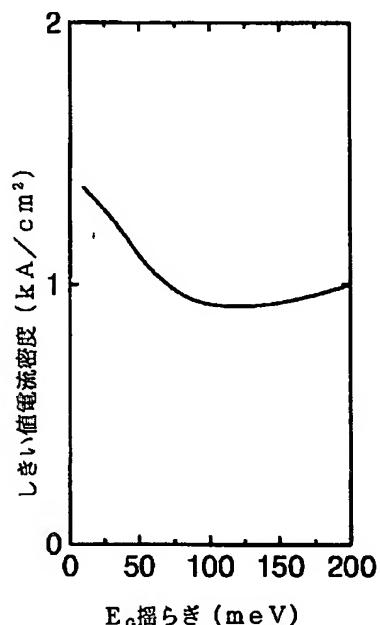
【図4】



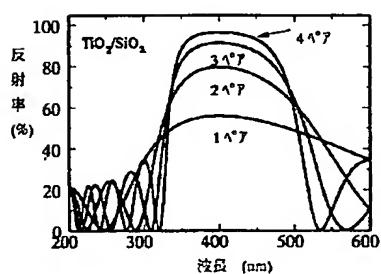
【図3】



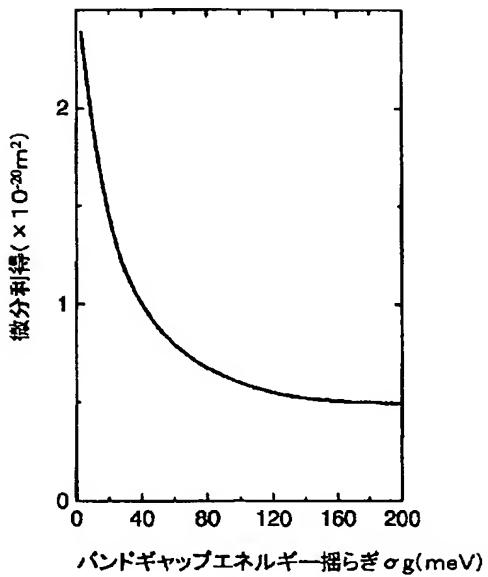
【図5】



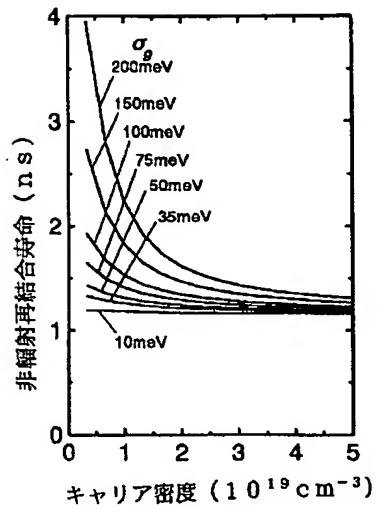
【図12】



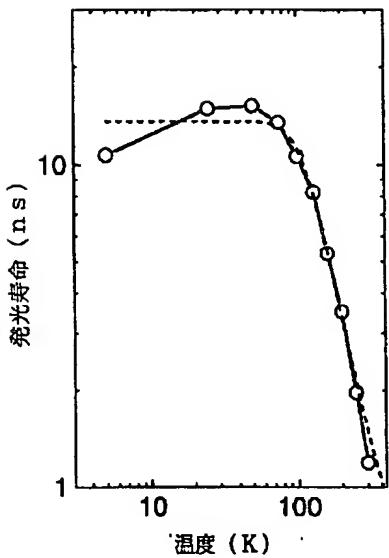
【図6】



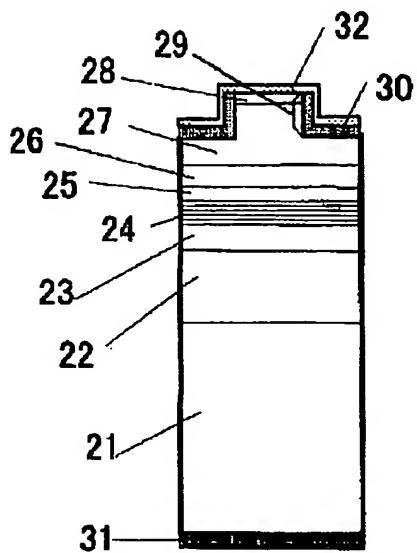
【図7】



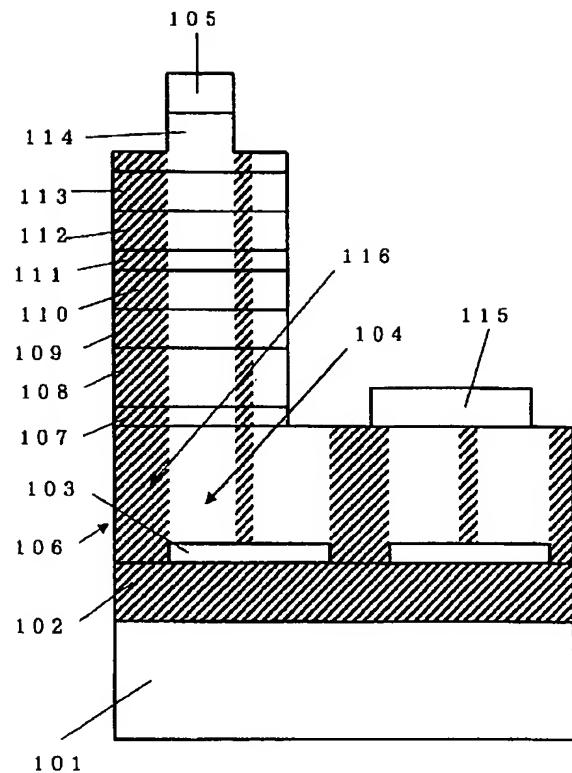
【図8】



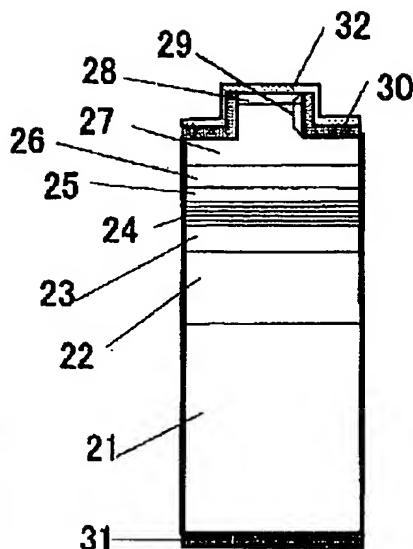
【図9】



【図10】



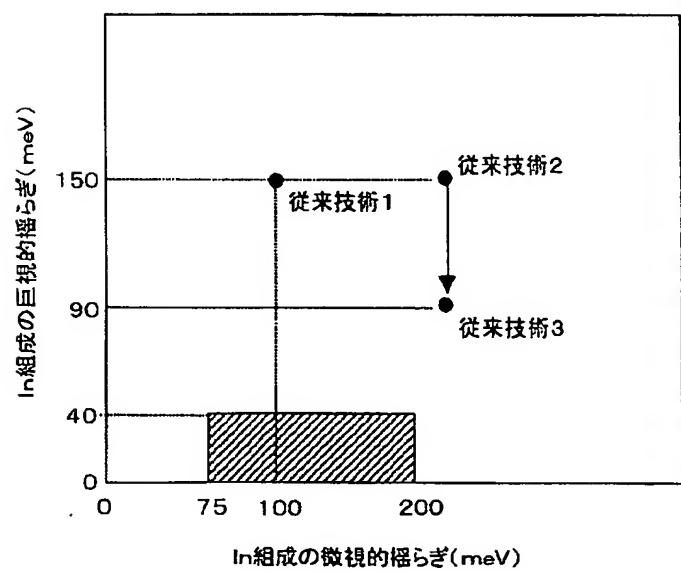
【図11】



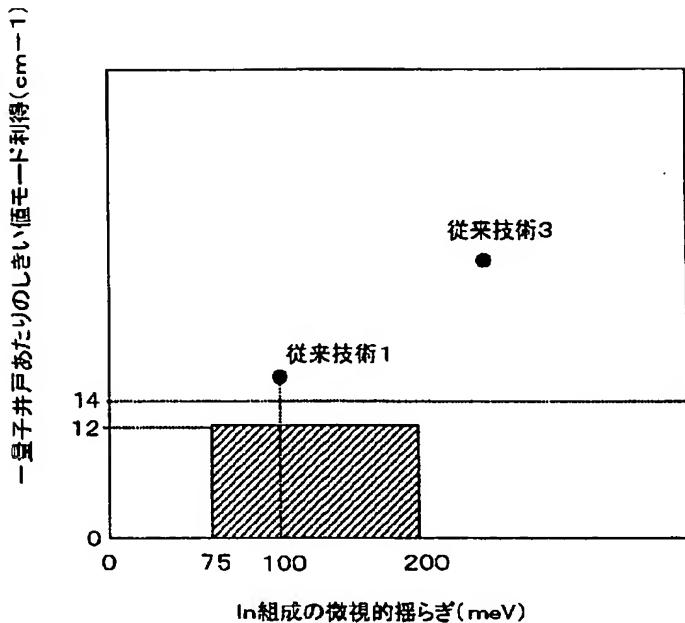
【図15】



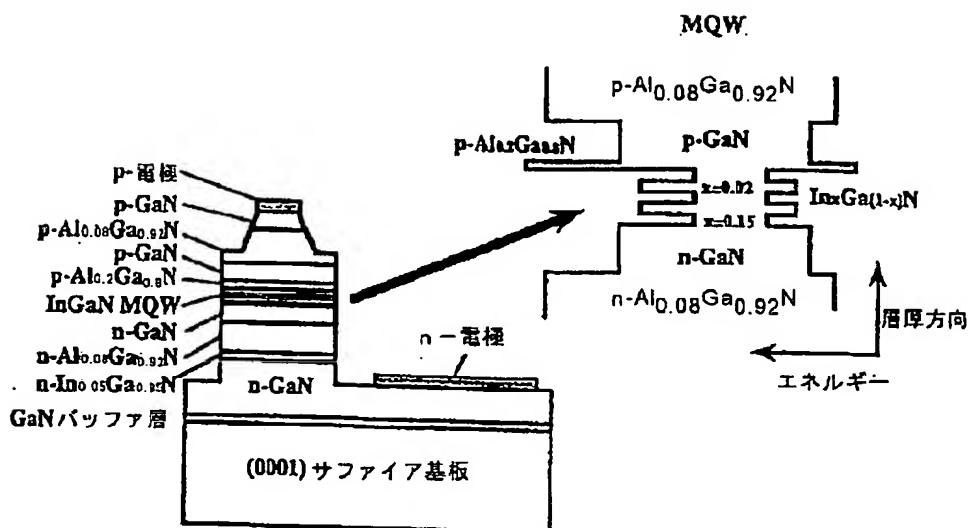
【図13】



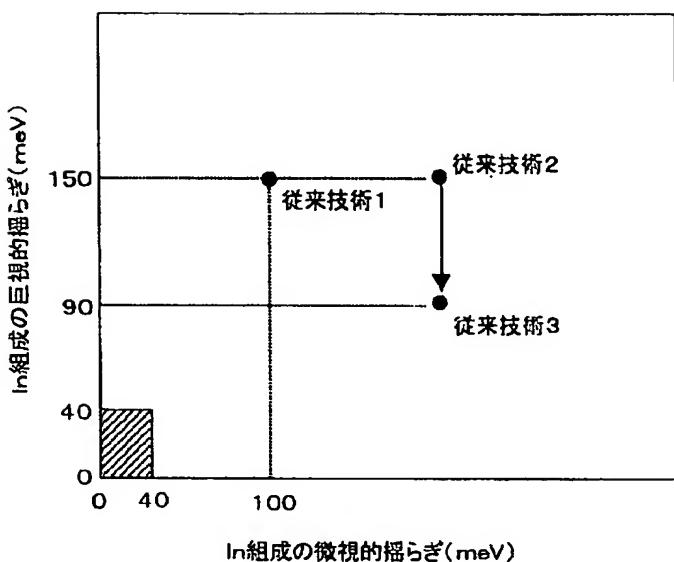
【図14】



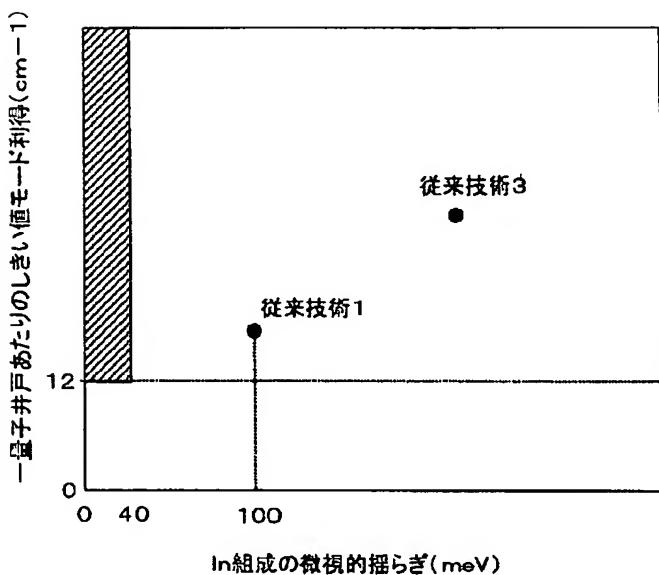
【図16】



【図17】



【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 仁道 正明
 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株
 式会社内

F ターム(参考) 5F073 AA13 AA74 AA83 BA06 CA17
 CB05 DA07 DA21 EA23